

doi: 10.13745/j.esf.2017.01.017

# 松辽盆地白垩系大陆科学钻探松科 2 井: 井底温度、地层压力预测

瞿雪姣<sup>1</sup>, 杨立伟<sup>2</sup>, 薛璇<sup>1</sup>, 高有峰<sup>3,\*</sup>, 王璞珺<sup>4</sup>

1. 重庆科技学院 石油与天然气工程学院, 重庆 401331
2. 中国石油大庆钻探工程公司 地质录井一公司, 黑龙江 大庆 163000
3. 吉林大学 古生物学与地层学研究中心, 吉林 长春 130026
4. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061

QU Xuejiao<sup>1</sup>, YANG Liwei<sup>2</sup>, XUE Xuan<sup>1</sup>, GAO Youfeng<sup>3,\*</sup>, WANG Pujun<sup>4</sup>

1. School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China
2. NO.1 Geo-logging Company of Drilling Engineering Corporation of PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing 163000, China
3. Research Center of Paleontology and Stratigraphy, Jilin University, Changchun 130026, China
4. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China

**QU Xuejiao, YANG Liwei, XUE Xuan, et al. Prediction of the bottom hole geotemperature, formation pressure and formation fracture pressure of the Continental Scientific Drilling of Cretaceous Songliao Basin (SK2). *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(1): 257-264**

**Abstract:** The designed depth of SK2 is 6400 m, which is the deepest scientific drilling in the East Asia. Previous studies shows that the Xujiaweizi Fault Depression is located in the high geotemperature area. However the high geotemperature and possible abnormal pressure are the main challenges for continental scientific drilling. Based on a great deal of geological and geophysical data including regional geological survey, petroleum exploration and exploitation and scientific achievements in the Songliao Basin, we predicted the bottom hole temperature, formation pressure and formation fracture pressure of target strata of SK2. According to the relationship between depth and present geotemperatures, geothermal gradients, we predicted the bottom hole geotemperature of SK2 probably range from 238.83 °C to 265.11 °C. According to the relationship between depth and formation pressures, and calculated results using DrillWorks, we estimated the formation pressure of Yingcheng Formation, Shahezi Formation and Huoshiling Formation to the bottom of the hole in the range of 30.54 – 37.72 MPa, 33.22 – 59.52 MPa, 59.52 – 67.18 MPa, respectively; and the formation fracture pressure range from 52.35 MPa to 58.62 MPa, from 61.88 MPa to 105.68 MPa, from 104.57 MPa to 118.03 MPa, respectively.

**Key words:** prediction of the bottom hole geotemperature; prediction of the formation pressure and formation fracture pressure; SK2; Cretaceous; Songliao Basin

**摘要:** 松辽盆地白垩系大陆科学钻探松科 2 井设计井深达 6 400 m, 是东亚地区最深的科学探井。松辽盆地地温梯度高, 深层孔隙流体压力组成与分布十分复杂, 因此准确预测地层温度和压力, 对整个钻探工程至关重要。通过对松科 2 井井区探井测温、试油数据的整理分析, 探索目的层地温、地温梯度、地层压力与深度规律, 对井底温度进行预测, 并对主要目的层地层压力和地层破裂压力进行分段预测。利用深度与地温关系、深度与地温梯度关系和深井对比等方法, 综合预测 6 400 m 井底温度为 238.83~265.11 °C。利用松科 2 井井区

收稿日期: 2016-09-08; 修回日期: 2016-10-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB822000); 重庆科技学院校内科研基金项目(CK2016B15); 中国地质调查局油气基础性公益性地质调查项目(DD20160207-06)

作者简介: 瞿雪姣(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事大陆科学钻探和石油地质研究。E-mail: quxuejiao2008@aliyun.com

\* 通讯作者简介: 高有峰(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事沉积学与地层学研究。E-mail: gaoyoufeng@jlu.edu.cn

地层压力与深度关系, 破裂压力系数平均值和 DrillWorks 软件计算结果, 综合预测营城组、沙河子组、火石岭组-井底地层压力分别为 30.54~37.72、33.22~59.52 和 59.52~67.18 MPa, 地层破裂压力分别为 52.35~58.62、61.88~105.68 和 104.57~118.03 MPa。

**关键词:** 井底温度预测; 地层压力预测; 松科 2 井; 白垩系; 松辽盆地

**中图分类号:** P534.53; P314.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2017)01-0257-08

位于中国东北的松辽盆地是世界上晚中生代规模最大、发育时间最长的陆相含油气湖盆, 有完整的古近纪早期—晚侏罗世以陆相沉积为主的地质记录, 是恢复近乎完整的白垩纪陆相沉积记录的理想地区, 可为陆相白垩系研究提供绝佳的地质基础<sup>[1-7]</sup>。松辽盆地白垩系大陆科学钻探松科 2 井之目的就在于获取营城组、沙河子组、火石岭组(晚白垩世—晚侏罗世)和盆地基底(二叠纪—石炭纪)连续岩心, 在松科 1 井的基础之上, 进一步研究白垩纪温室地球时期气候—环境变化, 拓展陆相油气勘探领域和资源量。

松科 2 井位于黑龙江省安达市羊草镇六撮房村东南约 0.25 km 处, 构造位置位于松辽盆地东南断陷区徐家围子断陷宋站鼻状构造, 设计井深达 6 400 m, 是东亚地区最深的科学探井。松辽盆地地温梯度高<sup>[8-10]</sup>, 各个断陷之间地层压力变化大<sup>[11-14]</sup>, 深层孔隙流体压力的组成与分布十分复杂<sup>[15-16]</sup>, 是松科 2 井钻探施工过程中面临的主要技术不确定因素。因此, 准确预测 6 400 m 井底可能达到的温度和主要目的层地层压力、地层破裂压力就显得尤为迫切。本文借助松辽盆地多年来区域地质调查和油气勘探生产积累的丰富地质、地球物理资料和大量科研成果, 通过对松科 2 井井区探井测温、试油数据的整理分析, 探索目的层地温、地温梯度、地层压力与深度规律, 对井底温度进行预测, 结合 DrillWorks 软件分析结果, 对主要目的层营城组、沙河子组、火石岭组的井底地层压力和地层破裂压力进行分段预测, 以期对钻探施工中钻具组合、泥浆配比、测井设备选择、测井项目及深度设计提供科学依据, 也为发现并保护深层可能的油气层, 选择合理钻井液体系, 做好现场随钻压力检测等工作提供可靠参考。

## 1 井底温度预测

### 1.1 地温梯度计算公式

地壳最表层温度受地面温度周期性变化的影响是随着深度的增加而减弱的, 至一定深度这种影响接

近于消失, 地温基本保持不变, 这个地温常年保持恒定的层、带称为恒温带<sup>[17]</sup>。恒温带的温度和深度是沉积盖层地温梯度和深部温度计算的起点<sup>[18]</sup>。根据气象部门统计, 安达地区大气年平均温度为 3.2 °C, 即恒温带的温度为 3.2 °C, 恒温带的深度一般在 15~30 m, 取 20 m 为恒温带深度。

地温梯度指深度每增加 100 m 地温增高的度数, 用下式表示:

$$G=100(T-T_0)/(H-H_0)$$

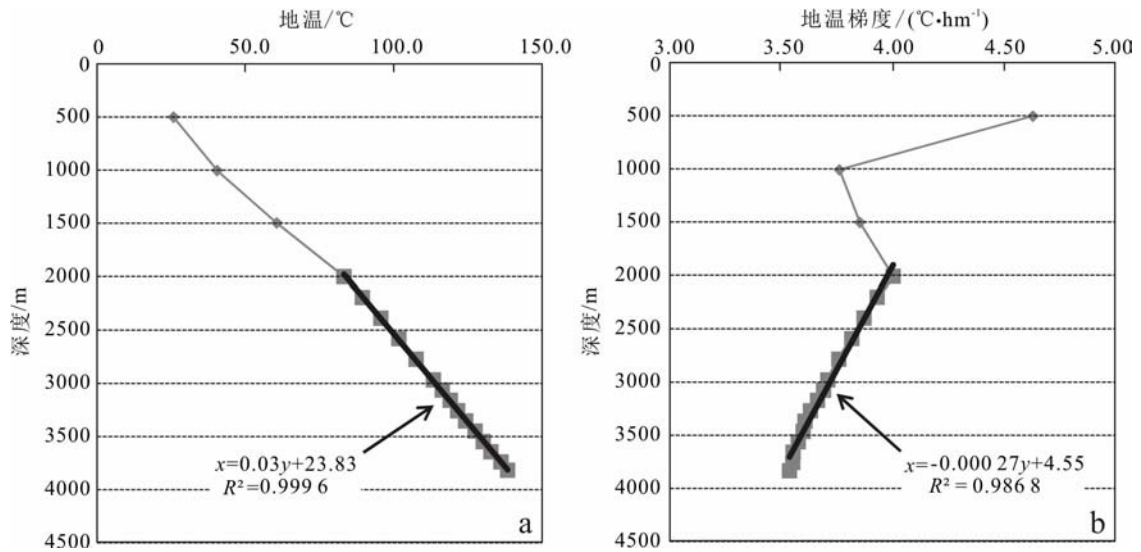
式中:  $G$  为地温梯度, °C·hm<sup>-1</sup>;  $T$  为深度  $H$  处的地层温度, °C;  $T_0$  为恒温带温度, °C;  $H$  为地温测点深度, m;  $H_0$  为恒温带深度, m。在计算时, 将同一口井不同深度上的地温梯度加以算术平均, 即为该井的地温梯度平均值。

### 1.2 松科 2 井井区深度与地温关系

松科 2 井井区达深 3 井从地表到 3 818.02 m, 徐深 902 井从地表到 3 725.51 m 以及徐深 6 井从 2 600 m 到 4 000 m 进行了连续测温。而 3 口井距松科 2 井的距离分别为 24.6、42.6 和 24.8 km, 这为研究松科 2 井井区深度与地温关系提供了极佳的实测数据。根据实测地温数据, 结合地温梯度计算公式, 制作地温与深度关系图和地温梯度与深度关系图(图 1~3), 从图中可以总结出如下规律: (1) 地温随深度增加而增加, 地温梯度总体随深度增加而减小(图 1~3)。(2) 从地表到 4 000 m, 地温与深度呈非线性关系, 特别是在 2 000 m 之上, 而 2 000 m 之下, 线性关系显著, 相关系数均大于 0.99(图 1a、图 2a、图 3a)。(3) 从地面到 4 000 m, 地温梯度与深度也呈非线性关系。从 0~1 000 m 地温梯度迅速下降, 1 000~2 000 m 地温梯度略有上升, 2 000 m 之下地温梯度线性降低的趋势明显, 相关系数均大于 0.98(图 1b、图 2b、图 3b)。

### 1.3 徐家围子断陷营城组—火石岭组深度与地温关系

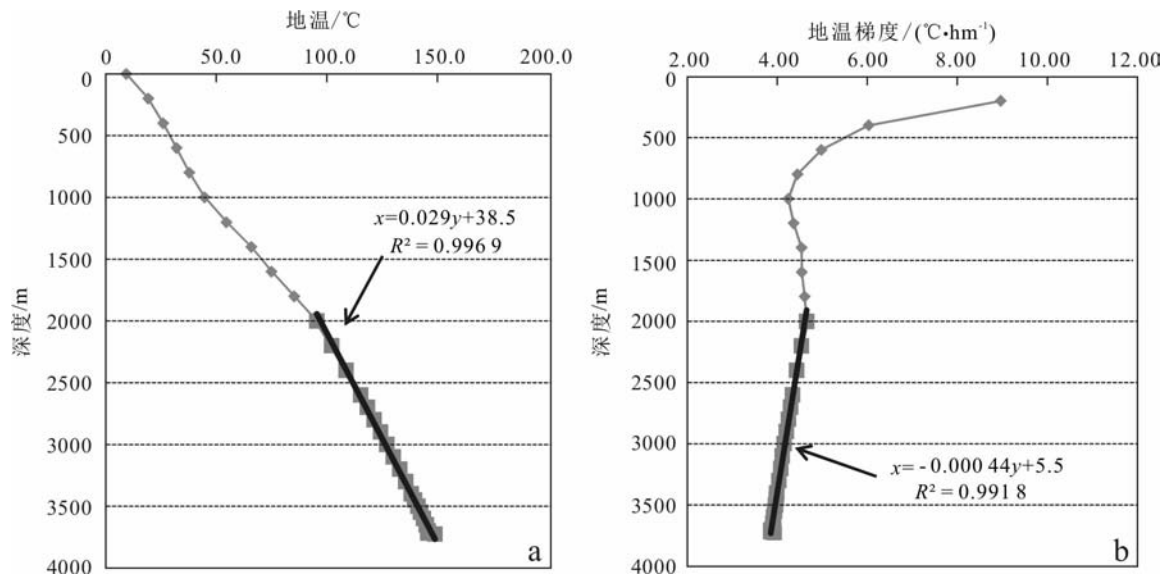
目前, 与松科 2 井相距 680 m 的宋深 3 井在 3 816 m 处已获得实测地温数据, 因此, 松科 2 井井底温度预测的关键在于探索 4 000 m 以下主要目的层深度与地温规律。对徐家围子断陷 53 口



a—地温与深度关系图；b—地温梯度与深度关系图。

图 1 达深 3 井地温、地温梯度与深度关系图

Fig. 1 The relationship between depth and geotemperature, geothermal gradients of Well Dashen3



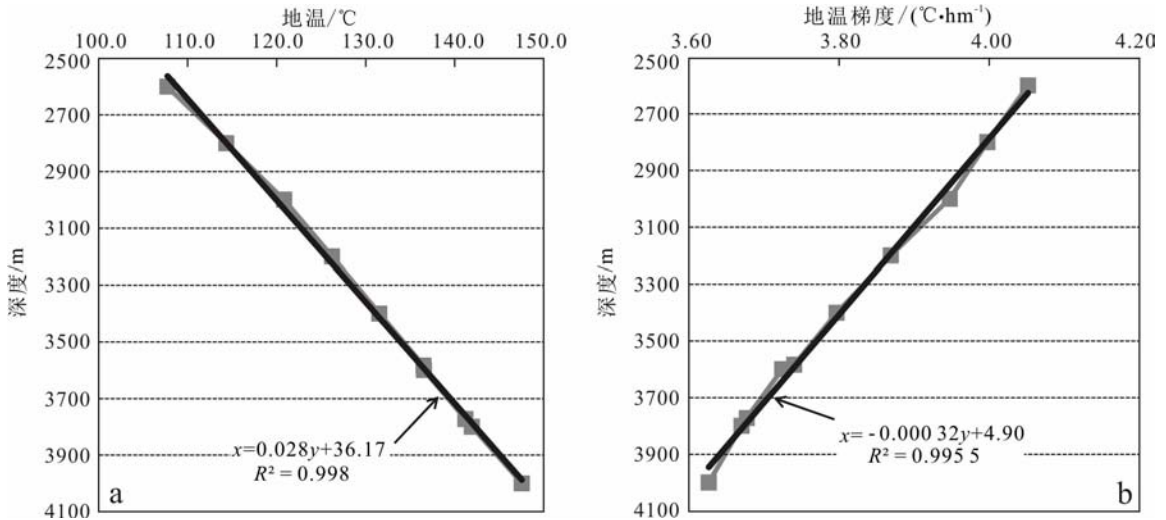
a—地温与深度关系图；b—地温梯度与深度关系图。

图 2 徐深 902 井温度、地温梯度与深度关系图

Fig. 2 The relationship between depth and geotemperature, geothermal gradients of Well Xushen902

井深大于 4 000 m 的深钻井进行实测地温统计整理, 获取松科 2 井主要目的层实测地温数据 154 个, 其中营城组 133 个、沙河子组 19 个、火石岭组 2 个。地温与深度关系见图 4, 地温梯度与深度关系见图 5。从图 4、图 5 中可以看出, 徐家围子断陷营城组—火石岭组地温、地温梯度与深度关系具有如下规律: (1) 人为干预剔除两个地温异常点后, 地温与深度显示较好的线性关系(图 4b)。(2) 自动

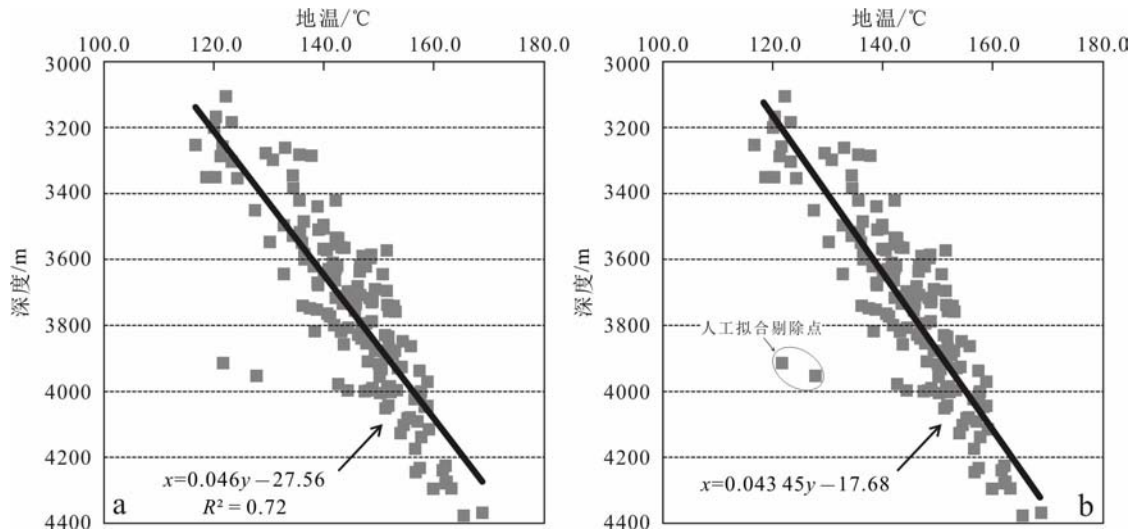
拟合的地温梯度与深度关系不明显, 相关系数仅为 0.063(图 5a)。(3) 人为干预剔除两个地温异常点后, 地温梯度与深度线性关系较明显, 其关系为  $x = -0.00022y + 4.69$  ( $x$  为地温梯度,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$ ;  $y$  为深度, m)(图 5b)。该曲线与达深 3 井 2 000 m 以下的地温梯度与深度线性关系十分接近(图 1b), 与徐深 6 井、徐深 902 井线性关系也较为相似(图 2b、图 3b)。



a—地温与深度关系图;b—地温梯度与深度关系图。

图3 徐深6井温度、地温梯度与深度关系图

Fig. 3 The relationship between depth and geotemperature, geothermal gradients of Well Xushen6



a—自动拟合曲线;b—人工拟合曲线。

图4 徐家围子断陷营城组—火石岭组地温与深度关系图

Fig. 4 The relationship between depth and geotemperature of Yingcheng, Shahezi and Huoshiling Formation in Xujiaweizi Fault Depression

### 1.4 松科2井井底温度预测

单井连续测温和多井目的层测温分析结果表明,徐家围子断陷2000 m以下地层深度与地温、地温梯度均具有较好的线性关系,可以利用这一规律对松科2井井底温度进行预测。另一方面,可利用营城组—火石岭组的平均地温梯度对井底温度进行预测和印证。

#### 1.4.1 深度与地温关系法

利用徐家围子断陷营城组—火石岭组深度与地温较好的线性关系(图4)进行预测:

$$x = 0.04345y - 17.68, R^2 = 0.77$$

式中: $x$ 为温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $y$ 为深度,  $\text{m}$ ;  $R^2$ 为相关系数。

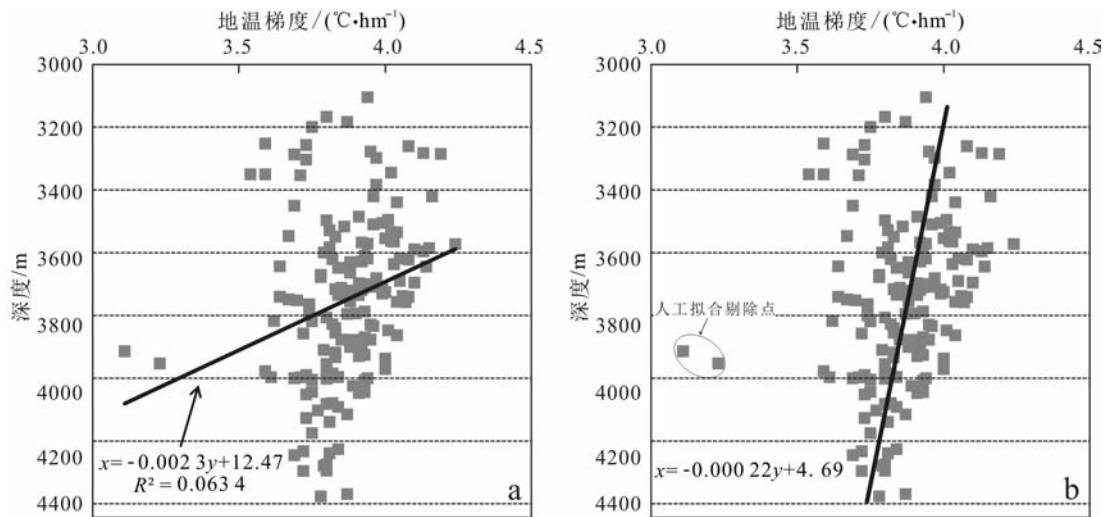
松科2井设计井深为6400 m,利用上式计算井底温度为260.40  $^{\circ}\text{C}$ ,平均地温梯度为4.03  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$ 。

#### 1.4.2 地温梯度法

与松科2井相距680 m的宋深3井3816 m实测最高地温为144  $^{\circ}\text{C}$ ,利用徐家围子断陷3800 m以下平均地温梯度,结合宋深3井实测地温对井底温度进行预测。

(1)深度与地温梯度关系法。利用徐家围子断陷营城组—火石岭组人工干预后拟合的地温梯度与深度关系(图5b):

$$x = -0.00022y + 4.69$$



a—自动拟合曲线;b—人工拟合曲线。

图5 徐家围子断陷营城组—火石岭组地温梯度与深度关系图

Fig. 5 The relationship between depth and geothermal gradients of Yingcheng Shahezi and Huoshiling Formation in Xujiaweizi Fault Depression

式中: $x$  为地温温度,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$ ;  $y$  为深度,  $\text{m}$ 。计算 3 800~6 400  $\text{m}$  的平均地温梯度  $G_1$ :

$$G_1 = \frac{\int_{y_1}^{y_2} (-0.0002y + 4.69)dy}{y_2 - y_1}$$

$$= \frac{\int_{3800}^{6400} (-0.0002y + 4.69)dy}{6400 - 3800}$$

$$= 3.67 \text{ } ^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$$

$$T_{\text{井底}} = T_{3816\text{m}} + G_1 \times (H_{\text{井底}} - 3816\text{m})$$

$$= 144 \text{ } ^{\circ}\text{C} + 3.67 \text{ } ^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1} \times (6400 - 3816)\text{m}$$

$$= 238.83 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

(2)平均地温梯度法。周庆华等于 2007 年曾计算得出徐家围子断陷层现今平均地温梯度为  $4.0 \text{ } ^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$ [19]。鉴于宋深 3 井已在 3 816  $\text{m}$  获得了实测地温值,为更精确地对松科 2 井井底温度进行预测,有必要针对徐家围子断陷大于 4 000  $\text{m}$  的钻井在 3 800  $\text{m}$  及以下深度实测的地温值进行重新分析。53 口井 64 个数据的平均地温梯度( $G_2$ )为  $3.74 \text{ } ^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ ,据此预测松科 2 井井底温度为

$$T_{\text{井底}} = T_{3816\text{m}} + G_2 \times (H_{\text{井底}} - 3816\text{m})$$

$$= 144 \text{ } ^{\circ}\text{C} + 3.74 \text{ } ^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1} \times (6400 - 3816)\text{m}$$

$$= 240.64 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

### 1.4.3 深井类比法

松辽盆地同裂谷期(150~110  $\text{Ma}$ ,包括火石岭组、沙河子组、营城组),在北部蒙古—鄂霍茨克洋和东部太平洋碰撞闭合的共同影响下,板块重组导致区

域性伸展和大规模裂隙,形成大范围分布的火山—沉积序列[6-7,20-21]。这个时期形成的古龙断陷与徐家围子断陷具有完全相同的成因背景,并一同经历了松辽盆地后期的拗陷和构造反转,因而具有相似的地温场。位于古龙断陷的古龙 1 井是松辽盆地目前最深的探井,其钻探深度为 6 300.84  $\text{m}$ ,并且该井与松科 2 井的距离仅为 83  $\text{km}$ ,其井底温度对预测松科 2 井井底温度具有重要的参考价值。古龙 1 井井底温度推算为  $261 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ [22],平均地温梯度为  $4.14 \text{ } ^{\circ}\text{C} \cdot \text{hm}^{-1}$ ,据此,推算松科 2 井井底温度为  $265.11 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 。

综上所述,通过对徐家围子断陷实测地温数据分析和松辽盆地目前最深钻井井底温度类比,预测松科 2 井井底温度为  $238.83 \sim 265.11 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 地层压力预测

### 2.1 压力系数计算公式

压力系数是某点压力与该点水柱压力之比,无因次,其数值等于该点的当量钻井液密度。当量钻井液密度是指将井内某一位置所受各种压力之和(静液压力、回压、环空压力损失等)折算成钻井液密度,称为这一点的当量钻井液密度[23]。把地层压力、地层破裂压力折算成钻井液密度,分别称为地层压力当量钻井液密度和地层破裂压力当量钻井液密度,其计算公式为

$$\rho_e = p/(gH)$$

式中:  $\rho_e$  为地层压力当量钻井液密度,  $g/cm^3$ ;  $p$  为压力, MPa;  $g$  为重力常数,  $9.81 N/kg$ ;  $H$  为井深, m;  $1 Pa=1 N/m^2$ 。

2.2 营城组地层压力和破裂压力预测

2.2.1 地层压力预测

利用松科 2 井邻井 5 口井 6 层营城组实测地层压力数据(表 1), 制作营城组地层压力与深度关系图(图 6), 两者间线性关系为

$$x=0.02y-28.68, R^2=0.50$$

式中:  $x$  为地层压力, MPa;  $y$  为深度, m;  $R^2$  为相关系数。

根据松科 2 井营城组顶底预测深度分别为 2 965 和 3 320 m, 预测营城组地层压力为 30.62~37.72 MPa。

又根据邻井营城组地层压力系数平均值为 1.06(表 1), 利用压力系数、压力和深度三者间的关系:

$$\text{压力系数} = p/(gH)$$

式中:  $p$  为压力, MPa;  $H$  为深度, m;  $g$  为重力常数,  $9.81 N/kg$ 。

预测营城组地层压力为 30.83~34.52 MPa。

利用北京奥格特公司 DrillWorks 软件预测营城组地层压力系数为 1.05, 预测营城组压力为 30.54~34.20 MPa。

综合来看, 3 种方法的预测值均较为接近, 营城组地层压力为 30.54~37.72 MPa, 如果钻遇气柱高度较大, 压力可能增大。

表 1 松科 2 井邻井营城组实测地层压力统计表

Table 1 The measured formation pressure of Yingcheng Formation in adjacent wells close to SK2

井号	层位	深度/m	地层压力 /MPa	压力梯度 /( $MPa \cdot hm^{-1}$ )	地层压力系数	平均压力系数	备注
宋深 4	K <sub>1y</sub>	2 519.0	24.16	0.96	0.98	1.06	试油井下压裂数据
升深 201	K <sub>1y</sub>	2 864.40	32.79	1.14	1.17		
升深 201	K <sub>1y</sub>	2 885.00	30.70	1.06	1.09		
升深 2	K <sub>1y</sub>	2 879.80	32.25	1.12	1.14		
宋深 1	K <sub>1y</sub>	3 133.6	28.65	0.91	0.93		
宋深 3	K <sub>1y</sub>	3 275.5	34.60	1.06	1.08		

2.2.2 地层破裂压力预测

破裂压力是试油过程中对某一深度段进行压裂得到的实测值, 因此, 不建立深度与实测破裂压力之间的函数关系进行破裂压力预测。根据松科 2 井邻

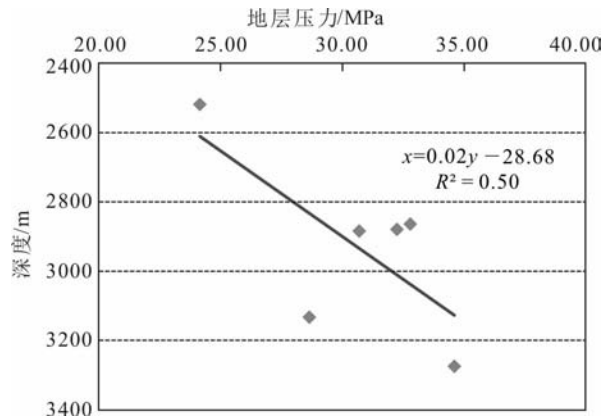


图 6 松科 2 井邻井营城组地层压力与深度关系图  
Fig. 6 The relationship between depth and formation pressure of Yingcheng Formation in adjacent wells close to SK2

井营城组破裂压力系数平均值为 1.8(表 2), 利用破裂压力系数、破裂压力和深度三者间的关系:

破裂压力系数=破裂压力/(压裂井段底深 $\times g$ )  
式中: 破裂压力单位为 MPa; 压裂井段底深单位为 m;  $g$  为重力常数,  $9.81 N/kg$ 。

预计营城组破裂压力为 52.35~58.62 MPa。

利用北京奥格特公司 DrillWorks 软件预测营城组地层破裂压力系数为 1.8~2.0, 为防止地层破裂压力预测过大造成井漏等事故, 破裂压力系数取小值 1.8, 预计营城组破裂压力也为 52.35~58.62 MPa。

表 2 松科 2 井邻井营城组实测地层破裂压力统计表

Table 2 The measured formation fracture pressure of Yingcheng Formation in adjacent wells close to SK2

井号	层位	井段/m	破裂压力 /MPa	破裂压力系数	平均破裂压力系数	备注
宋深 4	K <sub>1y</sub>	2 515.0~2 523.0	45.8	1.9	1.8	试油井下压裂数据
宋深 1	K <sub>1y</sub>	3 124.0~3 134.0	57.3	1.9		
宋深 1	K <sub>1y</sub>	3 390.0~3 406.2	54.7	1.6		
宋深 1	K <sub>1y</sub>	3 687.8~3 749.2	57.2	1.6		
宋深 5	K <sub>1y</sub>	2 920.0~2 928.0	53.2	1.9		
宋深 101	K <sub>1y</sub>	3 507.6~3 599.0	75.0	2.1		
升深 8	K <sub>1y</sub>	2 962.5~2 981.0	54.7	1.9		

2.3 沙河子组地层压力和破裂压力预测

2.3.1 地层压力预测

松科 2 井邻井沙河子组实测地层压力只有宋深 1 井 3 819.7 m 处一个数据点, 因此, 结合徐家围子断陷大于 4 000 m 钻井的其他沙河子组实测数据对沙河子组地层压力进行预测。

利用徐家围子断陷 8 口井 10 层沙河子组实测

地层压力数据(表 3),制作沙河子组地层压力与深度关系图(图 7),两者间线性关系为

$$x=0.0383y-100.5, R^2=0.62$$

式中: $x$  为地层压力,MPa; $y$  为深度,m; $R^2$  为相关系数。

根据松科 2 井沙河子组顶底预测深度分别为 3 320 和 5 670 m,预测沙河子组地层压力为 25.66~116.66 MPa。

松科 2 井沙河子组顶底预测深度分别为 3 320 和 5 670 m,又知沙河子组平均压力系数为 1.07(表 3),则预测沙河子组地层压力为 34.85~59.52 MPa。

利用北京奥格特公司 DrillWorks 软件预测沙河子组地层压力系数为 1.02,预测沙河子组压力为 33.22~56.74 MPa。

如果沙河子组底部 5 670 m 压力为 116.66 MPa,则平均压力系数为 2.10,明显超出松科 2 井邻井的实测结果,故该值不予参考。后两种方法预测的沙河子组地层压力较为接近,综合来看,沙河子组地层压力为 33.22~59.52 MPa,如果钻遇气柱高度较大,压力可能增大。

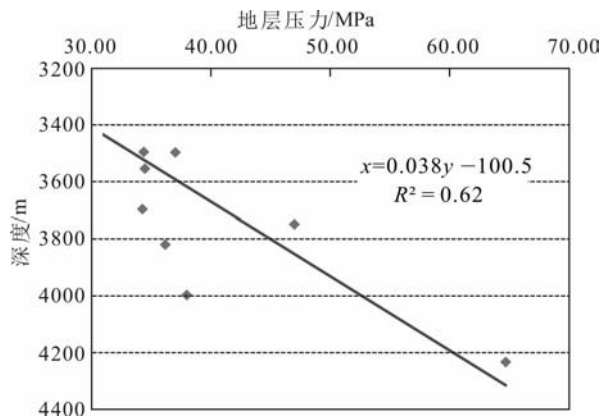


图 7 徐家围子断陷沙河子组地层压力与深度关系图  
Fig.7 The relationship between depth and formation pressure of Shahezi Formation in adjacent wells close to SK2

数为 1.9,则预测沙河子组地层破裂压力为 61.88~105.68 MPa。

利用北京奥格特公司 DrillWorks 软件预测沙河子组地层破裂压力系数为 1.9~2.0,为防止地层破裂压力预测过大造成井漏等事故,破裂压力系数取小值 1.9,预计沙河子组破裂压力也为 61.88~105.68 MPa。

表 3 徐家围子断陷沙河子组实测地层压力统计表  
Table 3 The measured formation pressure of Shahezi Formation in adjacent wells close to SK2

井号	层位	深度/m	地层压力 /MPa	压力梯度 /( $\text{MPa} \cdot \text{hm}^{-1}$ )	地层压力系数	平均压力系数	备注
宋深 1	$K_1sh$	3 819.7	36.2	0.95	0.97		
达深 1	$K_1sh$	3 997.48	38	0.95	0.97		
达深 3	$K_1sh$	3 748.68	47.01	1.25	1.28		
芳深 10	$K_1sh$	3 495.54	34.4	0.98	1.00		
芳深 8	$K_1sh$	3 696.94	34.28	0.93	0.95	1.07	试油
升深 5	$K_1sh$	3 554.32	34.487	0.97	0.99		井下
升深 6	$K_1sh$	3 105.2	27.74	0.89	0.91		压裂
升深 6	$K_1sh$	3 184.1	32.22	1.01	1.03		数据
升深 6	$K_1sh$	3 496.8	37.04	1.06	1.08		
徐深 1	$K_1sh$	4 233.08	64.708	1.53	1.56		

表 4 徐家围子断陷沙河子组实测地层破裂压力统计表  
Table 4 The measured formation fracture pressure of Shahezi Formation in adjacent wells close to SK2

井号	层位	井段/m	破裂压力 /MPa	破裂压力系数	平均破裂压力系数	备注
宋深 1	$K_1sh$	3 507.6~3 599.0	75	2.1		
宋深 1	$K_1sh$	3 687.8~3 749.2	57.2	1.6		
达深 3	$K_1sh$	3 807.0~3 803.0 3 796.0~3 792.0	69.3	1.9		试油
芳深 8	$K_1sh$	3 723.0~3 706.0	72.1	2.0	1.9	井下
芳深 9	$K_1sh$	3 737.6~3 729.0	63.3	1.7		压裂
升深 6	$K_1sh$	3 163.4~3 127.0	63.5	2.1		数据
徐深 1	$K_1sh$	4 480.0~4 435.2	84.6	1.9		
徐深 401	$K_1sh$	4 380.0~4 374.0	84.98	2.0		

### 2.3.2 地层破裂压力预测

松科 2 井邻井沙河子组实测地层破裂压力只有宋深 1 井两个实测数据点,因此,结合徐家围子断陷大于 4 000 m 钻井的其他沙河子组实测数据对沙河子组地层破裂压力进行预测。

根据徐家围子断陷 8 口井 8 层沙河子组测得的地层破裂压力数据(表 4),计算其平均破裂压力系

### 2.4 火石岭组-井底地层压力和破裂压力预测

#### 2.4.1 地层压力预测

徐家围子断陷火石岭组及以下地层暂无实测地层压力和破裂压力数据,因此,根据徐家围子断陷营城组和沙河子组平均压力系数为 1.07( $N=16$ )(表 1、表 3),结合火石岭组顶面和井底深度分别为 5 670 和 6 400 m,预测火石岭组顶面至井底的地层压力为 59.52~67.18 MPa。如果钻遇气柱高度较

大, 压力可能增大。

#### 2.4.2 地层破裂压力预测

根据徐家围子断陷营城组和沙河子组实测地层破裂压力, 深层平均破裂压力系数为 1.88 (表 2、表 4), 结合火石岭组顶面及以井底深度分别为 5 670 和 6 400 m, 预测火石岭组顶面至井底的地层破裂压力为 104.57~118.03 MPa。

由于本区储层主要为火山岩, 相互连通性较差, 因而地层压力变化会比较复杂, 也可能出现复杂情况。预测地层压力系数与将来实测压力系数可能存在偏差。

### 3 结论

(1) 松科 2 井井区具有地温与深度线性增高, 地温梯度与深度线性降低的规律。利用深度与地温关系、深度与地温梯度关系和深井对比等方法, 综合预测 6 400 m 井底温度为 238.83~265.11 °C。

(2) 利用松科 2 井井区地层压力与深度关系, DrillWorks 软件计算结果, 综合预测营城组、沙河子组、火石岭组的井底地层压力分别为 30.54~37.72, 33.22~59.52 和 59.52~67.18 MPa。

(3) 根据松科 2 井井区破裂压力系数平均值, DrillWorks 软件计算结果, 综合预测营城组、沙河子组、火石岭组-井底地层破裂压力分别为 52.35~58.62, 61.88~105.68 和 104.57~118.03 MPa。

#### 参考文献

[1] FENG Z Q, JIA C Z, XIE X N, et al. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, northeast China[J]. *Basin Research*, 2010, 22: 79-95.

[2] WANG C S. Environmental/climate change in the Cretaceous greenhouse world: Records from Terrestrial scientific drilling of Songliao Basin and adjacent areas of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 385: 1-5.

[3] WANG C S, FENG Z Q, ZHANG L M, et al. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SKI borehole sites in Songliao Basin, northeast China[J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 2013, 385: 17-30.

[4] WAN X Q, ZHAO J, SCOTT B W, et al. Late Cretaceous stratigraphy, Songliao Basin, NE China[J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 2013, 385: 31-43.

[5] 王成善, 冯志强, 吴河勇, 等. 中国白垩纪大陆科学钻探工

程: 松科一井科学钻探工程的实施与初步进展[J]. *地质学报*, 2008, 82(1): 9-20.

[6] 瞿雪姣, 王璞珺, 高有峰, 等. 松辽盆地断陷期火石岭组时代归属探讨[J]. *地学前缘*, 2014, 21(2): 234-250.

[7] 王璞珺, 赵然磊, 蒙启安, 等. 白垩纪松辽盆地: 从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 99-117.

[8] 吴乾蕃. 松辽盆地地温场与油气生成、运移、富集的关系[J]. *石油学报*, 1990, 11(1): 9-15.

[9] 任战利, 萧德铭, 迟元林. 松辽盆地古地温恢复[J]. *大庆石油地质与开发*, 2001, 20(1): 13-14, 55.

[10] 刘益中, 李成立, 周锡明, 等. 区域航磁资料在预测松辽盆地北部区域地温场中的应用[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 1063-1069.

[11] 王宏语, 康西栋, 李军, 等. 松辽盆地徐家围子地区深层异常压力分布及其成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2002, 32(1): 39-42.

[12] 向才富, 冯志强, 吴河勇, 等. 松辽盆地异常压力系统及其形成原因探讨[J]. *地质学报*, 2006, 80(11): 1752-1759.

[13] 狄嘉祥, 刘文龙, 吴世环. 徐家围子断陷徐南地区气藏超压成因[J]. *天然气工业*, 2009, 29(8): 42-43.

[14] 雷振宇, 解习农, 孟元林, 等. 松辽盆地齐家古龙一三肇凹陷超压对成岩作用的影响[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(4): 833-842.

[15] 刘文龙, 李思田, 孙德君, 等. 松辽盆地深层孔隙流体压力预测[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2000, 25(2): 137-142.

[16] 肖骏, 陈汉林, 杨树锋, 等. 松辽盆地北部深层火山岩气藏的充注: 来自流体包裹体的证据[J]. *石油学报*, 2011, 32(6): 968-975.

[17] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟, 等. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.

[18] 崔军平, 任战利, 肖晖, 等. 海拉尔盆地地温分布及控制因素研究[J]. *地质科学*, 2007, 42(4): 656-665.

[19] 周庆华, 冯子辉, 门广田. 松辽盆地北部徐家围子断陷现今地温特征及其与天然气生成关系研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37(增刊): 177-188.

[20] 陈崇阳, 王璞珺, 吴海波, 等. 海拉尔盆地火山岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球科学*, 2016, 41(8): 1259-1274.

[21] WANG P J, MATTERN F, DIDENKO N A, et al. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: an inverted active continental margin basin[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 159: 82-102.

[22] 梁勇. 油包水钻井液技术在古龙 1 井的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2010, 27(5): 15-17.

[23] 《石油天然气钻井井控》编写组. 石油天然气钻井井控[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.